

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 04-264207

(43)Date of publication of application : 21.09.1992

(51)Int.Cl.

G01B 11/00
G01C 3/06

(21)Application number : 03-045404

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP
<NTT>

(22)Date of filing : 19.02.1991

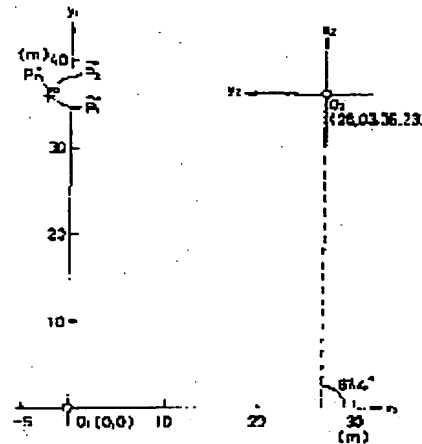
(72)Inventor : NARUSE HIROSHI
TATSUTA MITSUHIRO
NOBIKI ATSUSHI
IDE ATSUSHI

(54) MEASUREMENT OF MULTI-VIEW POINT STEREOSCOPIC IMAGE

(57)Abstract:

PURPOSE: To achieve higher measuring accuracy by performing a statistic processing considering anisotropy of errors in a multi-view point stereoscopic image measurement method in which a statistic processing is applied to the measurement results from a plurality of view points to measure the position of an object.

CONSTITUTION: A first view point O1 and a second view point O2 with a known relationship with the first view point O1 are used to measure coordinates of an object to be measured with true coordinates being P1° from the first and second view points O1 and O2 respectively. Probability density function of errors in the measurement is synthesized to determine the maximum likelihood estimated position of the object.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(6)

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平4-264207

(43) 公開日 平成4年(1992)9月21日

(51) Int.Cl. ⁵	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 B 11/00		H 7625-2F		
G 0 1 C 3/06		V 9008-2F		

審査請求 未請求 請求項の数1 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願平3-45404	(71) 出願人	000004226 日本電信電話株式会社 東京都千代田区内幸町一丁目1番6号
(22) 出願日	平成3年(1991)2月19日	(72) 発明者	成瀬 央 東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日 本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	立田 光廣 東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日 本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	野引 敦 東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日 本電信電話株式会社内
		(74) 代理人	弁理士 若林 忠

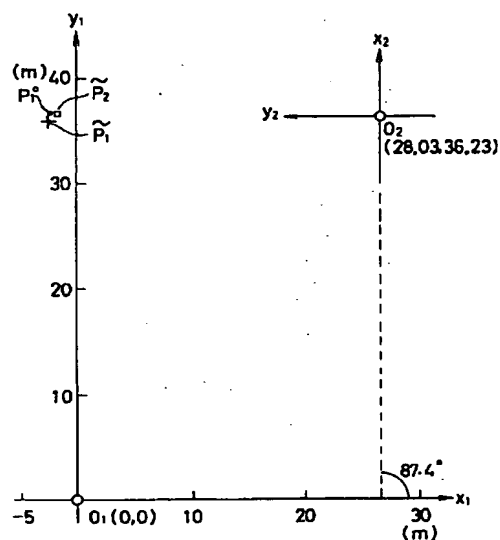
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 多視点ステレオ画像計測方法

(57) 【要約】

【目的】 複数の視点からの計測結果に統計処理を施して物体の位置を計測する多視点ステレオ画像計測方法において、誤差の異方性を考慮した統計処理を施すことにより、計測精度を向上させた方法を提供する。

【構成】 第1の視点 O_1 と第1の視点 O_1 との位置関係が既知である第2の視点 O_2 とを用い、真の座標が P_1^0 である計測対象の物体の座標を第1、第2の視点 O_1 、 O_2 のそれぞれから計測し、前記各計測における誤差の確率密度関数を合成して、前記物体の最尤推定位置を求める。



(2)

特開平4-264207

1

2

【特許請求の範囲】

【請求項1】 n (ただし $n \geq 2$) 個の視点からの計測結果に統計処理を施して物体の位置を計測する多視点ステレオ画像計測方法であって、第1の視点において前記物体を撮影し、撮影されたステレオ画像を演算処理して、前記第1の視点を基準点とする第1の視点座標系により前記物体の座標を計測する第1の工程と、前記第1の視点に既知量の並進操作および回転操作を施して得た第1 (ただし $2 \leq i \leq n$) の視点のそれぞれにおいて前記物体を撮影し、撮影されたステレオ画像を処理して、前記第1の視点を基準点とする第1の視点座標系により前記物体の座標を計測する第2の工程と、前記各視点座標系間の相対位置関係に基づいて、前記第1の工程および第2の工程で行なわれた各計測の誤差の確率密度関数を合成し、前記物体の最尤推定位置を求める第3の工程とを有する多視点ステレオ画像計測方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、ステレオ画像処理によって物体の位置を計測する方法に関し、特に複数の視点からの計測結果に統計処理を施して物体の位置を計測する多視点ステレオ画像計測方法に関する。

【0002】

【従来の技術】 工場における自動検査、測量などの分野において、3次元空間を視点に設けられた左右の2台のカメラによって2次元平面に投影し、2台のカメラ間の視差により物体の位置を計測するステレオ画像計測方法が用いられている。まず、このステレオ画像計測方法について図3により説明する。3次元空間を表す座標として x, y, z を用い、この3次元空間を左右の2台のカメラ *30

$$x = a(u + u') / (u - u') \quad \dots(1)$$

$$y = 2af / (u - u') \quad \dots(2)$$

$$z = 2av / (u - u') \quad \dots(3)$$

と求められる。

【0004】 このようなステレオ画像計測を行うための装置の一例の構成を図4に示す。この装置はデジタル画像処理によるものであり、左右の2台のテレビカメラ4で撮像された画像は、それぞれ走査線ごとに走査されて時間的に連続した画像信号に変換される。この画像信号は、各テレビカメラ4ごとに設けられたデジタル化5に入力し、デジタル化5内のサンブラによって、基盤の目のように2次元に配列された縦横それぞれ数百個の画素に標準化され、さらにデジタル化5内のA/D変換器によって、各画素に入射した光量に対応した数値階調に量子化される。このように左右の画像はそれぞれデジタル画像に変換され、各デジタル化5ごとに設けられた画像メモリ6のそれぞれに記憶される。そして計算機(CPU)7により、記憶されたデジタル画像に微分処理を施すなどして明るさの変化する場所としての物体の境界を検出する。このような処理を左右の画像について行うこ

*ラによって投影した2次元の画像面2、3上の位置を表す座標として u, v を用いる。 x 軸と u 軸、 z 軸と v 軸はそれぞれ平行であり、 y 軸はカメラの光軸1に平行であるとする。また、測量などの場合と同様に、 xy 平面は地平面と平行に水平であると仮定する。水準器などを用いれば、水平面を 0.1 mrad の精度で容易に設定できるから、この仮定は妥当なものである。視点を3次元空間座標系 (xyz 座標系) の原点 O とし、左右のカメラの投影中心 F, F' の中点を前記原点 O と一致させる。左右のカメラ間の距離を $2a$ とすると、投影中心 F, F' の3次元空間内の座標はそれぞれ $(-a, 0, 0), (a, 0, 0)$ となる。なお、現実のカメラの場合には、画像面はカメラの投影中心に関して計測対象の反対側にあり画像は倒立像となるが、図3では説明を容易にするため、画像面を計測対象と同じ側の、投影中心に関して対称の位置にし、画像が正立像となるようにしてある。このとき投影中心 F, F' と画像面との距離を f とすると、左右のカメラの画像面2、3における画像原点 O, O' の3次元空間座標はそれぞれ $(-a, f, 0), (a, f, 0)$ で表される。以下、左、右の画像をそれぞれ添字 l, r で表す。

【0003】 3次元空間内の点 P が、左右の画像面2、3上の点 $I(u, v), I'(u', v')$ にそれぞれ投影されたとする。ステレオ画像計測方法では、画像面上で点 I, I' を計測し、三角測量の原理によって点 P の3次元空間座標 (x, y, z) を算出する。ここでは、2台のカメラの光軸1が水平面内にあり、かつ x 軸と u 軸とが平行であるから、 u と u' とは同じ値となり、以下両者を区別せず u で表す。直線 FI と $F'I'$ が点 P で交わるという条件から点 $P(x, y, z)$ は、

とにより、それぞれの画像面上の対応点 $I(u, v), I'(u', v')$ が求められる。そののち上記式(1)~(3)によって点 $P(x, y, z)$ を求めればよい。

【0005】 次に、ステレオ画像計測における誤差の性質について説明する。ステレオ画像計測を満足するような位置精度でカメラを設定することは可能であり、ステレオ画像計測における誤差は、主として画像面上での投影点の位置計測精度に起因する。ここでは、画像面上での投影点の位置計測精度と3次元空間内での位置決定精度との関係について考察する。簡単のため、 u, u', v の計測誤差は統計的に同じ性質を有し、それらの標準偏差が σ であるとする。誤差の伝播法則から、式(1)~(3)により求められる x, y, z の標準偏差 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は、

【数1】

3

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial u_l}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial u_r}\right)^2} \sigma$$

$$= \frac{y \sqrt{x^2 + a^2}}{\sqrt{2} a f} \sigma \quad \dots (4)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial u_l}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u_r}\right)^2} \sigma$$

$$= \frac{y^2}{\sqrt{2} a f} \sigma \quad \dots (5)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial u_l}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial u_r}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial v}\right)^2} \sigma$$

$$= \frac{y \sqrt{z^2 + 2a^2}}{\sqrt{2} a f} \sigma \quad \dots (6)$$

のように表される。

【0006】通常、カメラの標準的な全視野角は50°程度以下であり、計測対象は主に地表面近くにあることから、 $y \gg x > z$ となる。よって、視点と計測対象までの距離 $(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ は y で近似できる。したがって、式(4)~(6)より、 x 軸方向および z 軸方向すなわち左右および上下方向では誤差が距離に比例して大きくなるのに対し、 y 軸方向すなわち奥行き方向では誤差が距離の2乗に比例して大きくなることがわかる。このためにステレオ画像計測では、視点から計測対象までの距離の増加とともに特に奥行き方向での計測誤差が著しく低下するという問題がある。

【0007】このような問題を解決し精度の高い計測を行う方法として、従来、2種類のものがあつた。第1の方法は、式(4)~(6)における σ を小さくするすなわち画像面上の投影点の座標 u, u, v を精度よく計測することにより σ, σ, σ を減少させる方法である。特にデジタル画像処理を行う場合には、画像をせいぜい縦横それぞれ数百個の画素に標準化するため空間分解能が低*

により計測対象の座標

【外2】

$$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$$

を推定するようになっている。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】上述の複数の視点を用い距離の2乗に逆比例した重みを用いて重み付き平均を

(3)

特開平4-264207

4

*く、画像面上の座標を決定するさいの誤差が大きい。そこで特願昭63-196007に示されるように、標準化されたデータを補間して画像面上の座標を精度よく求める方法が提案されている。データの補間を行うことによりある程度精度は向上するが、視点と計測対象との距離の増加とともにその増加をはるかに上回る誤差が生じてしまう。

【0008】第2の方法は、相対的な位置関係が既知である複数の視点から計測した多数のデータを統合することにより精度を向上させる方法である。なお、前記第1の方法とこの第2の方法とは独立のものであるから、併用することにより両者の利点を活かすことができる。この第2の方法は、奥行き方法の誤差が視点から計測対象までの距離の2乗に比例することに注目し、各視点から得られた計測データに距離の2乗に逆比例する重みをつけ、重み付き平均を求めて真の座標を推定する方法である(浅田 稔, "センサ情報の統合と理解による移動ロボットののための世界モデルの構築", 日本ロボット学会誌, 8巻, 2号, 160~170頁)。

【0009】この第2の方法について図5を用いて説明する。図5では簡単のため、2次元で表示し、記号 \sim を付加することにより各座標軸を表示してある。第1の視点を原点とする座標系(第1の視点座標系)を基準座標系とし、第1の視点を原点とする座標系(第1の視点座標系)において $P(x, y, z)$ で現される点の第1の視点座標系での表示を $P_1(x_1, y_1, z_1)$ とする。ここで $i=1, 2, \dots, n$ であり、 n は計測に用いた視点の総数である。さらに計測値と推定値とをそれぞれ

【外1】

\sim, \sim

で区別する。この方法では、複数の視点から得られたデータに対し、各視点からの距離の2乗に逆比例した重み W を用いて、

【数2】

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \hat{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \dots (7)$$

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \hat{y}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \dots (8)$$

$$\hat{z} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \hat{z}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \dots (9)$$

求める方法では、誤差の異方性を考慮していないため、計測対象の位置の正しい推定値が得られないという問題点がある。以下、その理由について図6を用いて説明する。図6では簡単のため2次元計測の場合を考える。

【0011】基準座標系として第1の視点座標系を使用し、この座標系における物体の真の点を $P_1^0(x_1^0, y_1^0)$ とし○で表す。また、第1の視点 O_1 から点 P_1^0 を計測

5

したときの計測値、第2の視点 O_2 から点 P_1^* を計測したときの計測値のそれぞれを

【外3】

$$\tilde{P}_1(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1), \tilde{P}_2(\tilde{x}_2, \tilde{y}_2)$$

とし、それぞれ●で表す。また、—を用いて各座標軸を

【外4】

$$\tilde{x}_1$$

のように表す。図6において、各視点座標系の y 方向に長軸を有する楕円10が描かれているが、ステレオ計測における等誤差面は奥行き方向に長軸が傾ね向いている楕円体となるので、この楕円10は等誤差面を表している。計測された x, y 座標値に単純に距離の2乗に逆比例した重みを用いた場合には、2点

【外5】

$$\tilde{P}_1, \tilde{P}_2$$

を結ぶ直線上の内分点として△で表示されている推定点

【外6】

$$\hat{P}$$

を求める。しかしステレオ画像計測における誤差の性質を考えると、誤差が等方的ではないため、真の点 P_1^* がこの直線上にあることは偶然であり、通常の場合は図6に示したようにこの直線上にはなく、正しい推定が行われないことになる。

【0012】本発明の目的は、複数の視点からの計測結果に統計処理を施して物体の位置を計測する多視点ステレオ画像計測方法において、誤差の異方性を考慮した統計処理を施すことにより、計測精度を向上させた方法を

提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明の多視点ステレオ画像計測方法は、 n (ただし $n \geq 2$) の視点を用い、第1の視点において前記物体を撮影し、撮影されたステレオ画像を演算処理して、前記第1の視点を基準点とする第1の視点座標系により前記物体の座標を計測する第1*

$$S = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma^3} \exp \left\{ -\frac{(du^2 + du_r^2 + dv^2)}{2\sigma^2} \right\} \quad \dots (10)$$

で与えられる。標準偏差 σ が定数であることと指数関数

$$E = du^2 + du_r^2 + dv^2$$

とおけば、最も確からしい座標は、 S を最大すなわち E を最小にする座標として求められる。

【0017】2次元の画像座標系で表されている E を次※

$$u = f(x+a)/y \quad \dots (12)$$

$$u = f(x-a)/y \quad \dots (13)$$

$$v = fz/y \quad \dots (14)$$

が得られる。式(12)~(14)の全微分をとると、

*の工程と、前記第1の視点に既知量の並進操作および回転操作を施して得た第1 (ただし $2 \leq i \leq n$) の視点のそれぞれにおいて前記物体を撮影し、撮影されたステレオ画像を処理して、前記第1の視点を基準点とする第1の視点座標系により前記物体の座標を計測する第2の工程と、前記各視点座標系間の相対位置関係に基づいて、前記第1の工程および第2の工程で行なわれた各計測の誤差の確率密度関数を合成し、前記物体の最尤推定位置を求める第3の工程とを有する。

【0014】

【作用】複数の視点間の相対位置関係に基づいて、複数の視点からの計測の誤差の確率密度関数を求め、確率密度関数を合成して最尤推定位置を求めるので、誤差の異方性が結果に反映され、最も確からしい座標を求めることができる。以下、本発明の作用について詳述する。

【0015】まず、本発明の作用を述べるに当たり、ステレオ画像計測における誤差の異方性の性質について説明する。ステレオ画像計測では、上述したように物体が投影された左右の画像面上の座標から上述の式(1)~(3)を用いて計測対象の物体の座標を求める。したがって、3次元空間における位置の決定精度は、画像面上の座標の計測精度に依存する。ここでは画像面上の座標の計測誤差が標準偏差 σ の正規分布にしたがうと仮定する。またこの計測には、垂直方向と水平方向との測定値の間の相互干渉、さらには左右の画像の測定値間の相互干渉がなく、それぞれの誤差が互いに影響を与えないものとする。水平方向と垂直方向の測定の標準偏差 σ 、 σ が互いに異なる場合もありうるが、ここでは説明の簡単のためすべて同一とする。仮に標準偏差 σ 、 σ が異なるとしても結論に大差はない。

【0016】この標準偏差 σ は、使用する測定系、すなわち光学系や画像面座標の決定アルゴリズムによって決定される固有の値である。画像面上の座標 u 、 u 、 v の計測誤差が独立であって、それぞれが同じ正規分布をするという仮定から、計測誤差 du 、 du 、 dv が同時に起こる確率密度関数 S は、

【数3】

が単調増加関数であることから、誤差評価関数 E を

…(11)

※のように3次元の空間座標系に変換する。式(1)~(3)を u 、 u 、 v について解くと、

【数4】

(5)

特開平4-264207

$$du_l = \frac{f}{y} dx - \frac{f(x+a)}{y^2} dy \quad \dots (15)$$

$$du_r = \frac{f}{y} dx - \frac{f(x-a)}{y^2} dy \quad \dots (16)$$

$$dv = -\frac{fz}{y^2} dy + \frac{f}{y} dz \quad \dots (17)$$

となることから、式(15)～(17)を式(11)に代入すると、【数5】

$$E = 2 \frac{f^2}{y^2} dx^2 + f^2 \frac{2(x^2+a^2)+z^2}{y^4} dy^2 + \frac{f^2}{y^2} dz^2 - 4 \frac{f^2 x}{y^3} dx dy - 2 \frac{f^2 z}{y^3} dy dz \quad \dots (18)$$

が導かれる。式(18)は dx, dy, dz と E の関係、すなわち dx, dy, dz と確率密度関数 S との関係を表している。

【0018】通常、実際のステレオ画像計測では、図3に示した xy 平面は水準器などを用いて $mrad$ 以下に水平を保って実施されるため、以下では視点間の相対位置関係として鉛直軸まわりの回転と水平面内での平行移動を*

*考える。さらに、説明を簡単にするために平板測量などの2次元の計測を考え、 v 軸については考慮しないものとする。しかし、以下の議論は3次元に容易に拡張できる。

【0019】式(10)に対応する2次元計測の確率密度関数 S は、

【数6】

$$S = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{du_l^2 + du_r^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \dots (19)$$

であり、これより得られる誤差評価関数 E は

【数7】

$$E = 2f^2 \left(\frac{dx^2}{y^2} + \frac{x^2+a^2}{y^4} dy^2 - 2 \frac{x}{y^3} dx dy \right) \quad \dots (20)$$

となる。すなわち、式(10)、(11)において、 $dv=0$ とし、 $(2\pi)^{1/2}\sigma^2$ を $2\pi\sigma^2$ で置き換えたものにな※

※る。式(20)は適当な直交変換によって次の標準方程式(21)に変形できる。

$$E/2f^2 = \lambda_1 \xi^2 + \lambda_2 \eta^2 + \rho \quad \dots (21)$$

ここで、 λ_1, λ_2 は、式(20)の特性方程式

【数8】

$$\lambda^2 - \left(\frac{1}{y^2} + \frac{x^2+a^2}{y^4} \right) \lambda + \left[\left(\frac{1}{y^2} \right) \left(\frac{x^2+a^2}{y^4} \right) - \left(\frac{x}{y^3} \right)^2 \right] = 0 \quad \dots (22)$$

の2根である。式(22)の根と係数との関係から、2根の

積 $\lambda_1 \lambda_2$ および和 $\lambda_1 + \lambda_2$ はそれぞれ

$$\lambda_1 \lambda_2 = (y^2 + x^2 + a^2) / y^4 > 0 \quad \dots (23)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = a^2 / y^2 > 0 \quad \dots (24)$$

となり、

$$\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0 \quad \dots (25)$$

が導かれる。したがって式(19)で示された確率密度関数 S の等誤差面は楕円であることが明らかになった。

★測精度の向上を図る。ここでは各視点間の相対的な位置関係、すなわち座標変換パラメータは既知であるとする。第 i 番目の視点における計測誤差を与える確率密度関数を S_i ($i=1, 2, \dots, n$) とすると、最尤推定座標は

【数9】

$$S = \prod_{i=1}^n S_i \quad \dots (26)$$

を最大とする座標として与えられる。すなわち、

【数10】

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n (du_{li}^2 + du_{ri}^2) \quad \dots (27)$$

を最小とする座標として求められる。ここで、 du_{li}, du_{ri} は第 i 番目の視点における画像面上の投影座標

(6)

特開平4-264207

9

10

u, u, に含まれる誤差を表す。後で証明するように、式(26)で表される各視点での誤差の確率密度関数、あるいは式(27)で表される誤差楕円を合成すると、合成後の等誤差面の形状が楕円となることから、この合成誤差楕円の中心座標が最大確率を与えることになる。以下、その求め方を具体的に述べる。

*

$$x = x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta - t \quad \dots (28)$$

$$y = -x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta - t \quad \dots (29)$$

すなわち x y 座標系は、x₁ y₁ 座標系を、x₁ y₁ 平面に直交し O₁ を通る軸のまわりに θ だけ回転し、そののち回転後の座標軸に沿って t, t だけ平行移動したものであるとする。

【0022】今、第1の視点座標系において座標 P⁰(x⁰, y⁰)にある物体を計測して得られた計測座標を

※

【数11】

$$d x_i = \tilde{x}_i^0 - x_i^0 \quad \dots (30)$$

$$d y_i = \tilde{y}_i^0 - y_i^0 \quad \dots (31)$$

で表される。式(15), (16)において x, y を

【外8】

$$\tilde{x}_i, \tilde{y}_i$$

と、また dx, dy を d x, d y とみなすことにより、d u, d u, が近似的に得られる。これらの d x, d y を計算するのに必要な第1の視点座標系における真の座標(x⁰, y⁰)を、式(28), (29)を用いて第1の視

座標系を用いて、
【数12】

$$E = \sum_{i=1}^n c_{1i} (x_i^0)^2 + \sum_{i=1}^n c_{2i} (y_i^0)^2 + 2 \sum_{i=1}^n c_{3i} x_i^0 y_i^0 + 2 \sum_{i=1}^n c_{4i} x_i^0 + 2 \sum_{i=1}^n c_{5i} y_i^0 + 2 \sum_{i=1}^n c_{6i} \quad \dots (32)$$

と書ける。ここで係数 c₁ ~ c₆ は、

【数13】

$$c_{11} = \frac{\cos^2 \theta_1}{\tilde{y}_1^2} + 2 \frac{\tilde{x}_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1}{\tilde{y}_1^3} + \frac{(\tilde{x}_1^2 + a^2) \sin^2 \theta_1}{\tilde{y}_1^4} \quad \dots (33)$$

$$c_{21} = \frac{\sin^2 \theta_1}{\tilde{y}_1^2} - 2 \frac{\tilde{x}_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1}{\tilde{y}_1^3} + \frac{(\tilde{x}_1^2 + a^2) \cos^2 \theta_1}{\tilde{y}_1^4} \quad \dots (34)$$

$$c_{31} = \frac{\cos \theta_1 \sin \theta_1}{\tilde{y}_1^2} + 2 \frac{\tilde{x}_1 (\sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1)}{\tilde{y}_1^3} - \frac{(\tilde{x}_1^2 + a^2) \cos \theta_1 \sin \theta_1}{\tilde{y}_1^4} \quad \dots (35)$$

$$c_{41} = \frac{-t_{x1} \cos \theta_1}{\tilde{y}_1^2} + \frac{(a^2 - \tilde{x}_1 t_{x1}) \sin \theta_1 + \tilde{x}_1 t_{y1} \cos \theta_1}{\tilde{y}_1^3} + \frac{(\tilde{x}_1^2 + a^2) t_{y1} \sin \theta_1}{\tilde{y}_1^4} \quad \dots (36)$$

$$c_{51} = -\frac{t_{x1} \sin \theta_1}{\tilde{y}_1^2} + \frac{(\tilde{x}_1 t_{x1} - a^2) \cos \theta_1 + \tilde{x}_1 t_{y1} \sin \theta_1}{\tilde{y}_1^3} - \frac{(\tilde{x}_1^2 + a^2) t_{y1} \cos \theta_1}{\tilde{y}_1^4} \quad \dots (37)$$

$$c_{61} = \frac{t_{x1}^2 + a^2}{\tilde{y}_1^2} - 2 \frac{(\tilde{x}_1 t_{x1} - a^2) t_{y1} + (\tilde{x}_1^2 + a^2) t_{y1}^2}{\tilde{y}_1^3} \quad \dots (38)$$

である。

【0023】次に、第1の視点における最尤推定座標を、式(32)の合成誤差評価関数すなわち合成楕円の中心

【外10】

$$\hat{P}_1(\hat{x}_1, \hat{y}_1)$$

として求める。式(32)について、

【外11】

11
(\hat{x}_1, \hat{y}_1)

$$\begin{aligned} x_1 &= X_1 + \hat{x}_1 \\ y_1 &= Y_1 + \hat{y}_1 \end{aligned}$$

(7)

特開平4-264207

12

*が原点になるような座標原点の平行移動
【数14】

... (39)

... (40)

を考える。式(39), (40)を式(32)に代入すると、式(32) は

$$E = C_1 X_1^2 + C_2 Y_1^2 + 2 C_3 X_1 Y_1 + 2 C_4 X_1 + 2 C_5 Y_1 + C_6 \quad \dots (41)$$

となる。ただし、 $C_1 \sim C_6$ はそれぞれ

【数15】

$$C_1 = \sum_{i=1}^n c_{1i} \quad \dots (42)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^n c_{2i} \quad \dots (43)$$

$$C_3 = \sum_{i=1}^n c_{3i} \quad \dots (44)$$

$$C_4 = \sum_{i=1}^n c_{1i} \hat{x}_1 + \sum_{i=1}^n c_{3i} \hat{y}_1 + \sum_{i=1}^n c_{4i} \quad \dots (45)$$

$$C_5 = \sum_{i=1}^n c_{3i} \hat{x}_1 + \sum_{i=1}^n c_{2i} \hat{y}_1 + \sum_{i=1}^n c_{5i} \quad \dots (46)$$

$$C_6 = \sum_{i=1}^n c_{1i} \hat{x}_1^2 + \sum_{i=1}^n c_{2i} \hat{y}_1^2 + 2 \sum_{i=1}^n c_{3i} \hat{x}_1 \hat{y}_1 + 2 \sum_{i=1}^n c_{4i} \hat{x}_1 + \sum_{i=1}^n c_{5i} \hat{y}_1 + \sum_{i=1}^n c_{6i} \quad \dots (47)$$

である。合成楕円の中心を原点としたことから、 X_1 と
 Y_1 の係数すなわち式(45), (46)で表される C_4 と C_5 はそ
れぞれ0でなければならない。この条件から得られる連
立方程式を解くことによって、最尤推定座標

【外12】

※ (\hat{x}_1, \hat{y}_1)

は、次のように求められる。

【数16】

※

$$\hat{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n c_{3i} \sum_{j=1}^n c_{6i} - \sum_{i=1}^n c_{2i} \sum_{j=1}^n c_{4i}}{\sum_{i=1}^n c_{1i} \sum_{j=1}^n c_{2i} - \left(\sum_{i=1}^n c_{3i} \right)^2} \quad \dots (48)$$

$$\hat{y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n c_{3i} \sum_{j=1}^n c_{4i} - \sum_{i=1}^n c_{1i} \sum_{j=1}^n c_{5i}}{\sum_{i=1}^n c_{1i} \sum_{j=1}^n c_{2i} - \left(\sum_{i=1}^n c_{3i} \right)^2} \quad \dots (49)$$

【0024】次に、合成確率密度関数の等誤差面、すな
わち誤差楕円を合成した結果が楕円になることを証明す
る。第1、第2の視点から計測して得られた計測結果の
不確実性を示す誤差楕円をそれぞれ第1、第2の誤差楕
円とする。これら誤差楕円は、適当な大きさの誤差に対
応する等誤差面を構成する楕円である。図7に示すよう
に、第1の誤差楕円11の中心を原点 Q_1 とし、この楕
円の主軸と一致するように座標軸 ξ_1 軸、 η_1 軸をとり
(第1の視点座標系)、これら各軸方向の半径をそれぞ

れ $r_{\xi 1}$ 、 $r_{\eta 1}$ とする。また第2の誤差楕円12につい
ても同様にその中心を原点 Q_2 とし、主軸と一致するよ
うに ξ_2 軸、 η_2 軸をとり(第2の視点座標系)、これら
各軸方向の半径をそれぞれ $r_{\xi 2}$ 、 $r_{\eta 2}$ とする。ここで
は、 $r_{\xi 1}$ 、 $r_{\eta 2}$ をそれぞれ長軸とし、 $r_{\eta 1}$ 、 $r_{\xi 2}$ を短
軸とするように座標軸をとるものとする。

【0025】ところで、誤差評価関数 E として、各視点
における計測の等誤差面の方程式

【数17】

13

$$E_1 = \frac{\xi_1^2}{r_{\theta 1}^2} + \frac{\eta_1^2}{r_{\theta 1}^2} \quad \dots (50)$$

$$E_2 = \frac{\xi_2^2}{r_{\theta 2}^2} + \frac{\eta_2^2}{r_{\theta 2}^2} \quad \dots (51)$$

を考える。なお図7の傾差楕円11、12は式(50)、(51)で表される傾差評価関数 E_1 、 E_2 の値がそれぞれ1となる場合の等傾差面を示したものである。 ξ_1 、 η_1 座標系*

$$\xi_2 = \xi_1 \cos \theta + \eta_1 \sin \theta - t_1 \quad \dots (52)$$

$$\eta_2 = -\xi_1 \sin \theta + \eta_1 \cos \theta - t_1 \quad \dots (53)$$

すなわち ξ_2 、 η_2 座標系は、 ξ_1 、 η_1 座標系を、 ξ_1 、 η_1 平面に直交し Q_1 を通る軸のまわりに θ だけ回転し、そのうち回転後の座標軸に沿って t_1 、 t_1 だけ平行移動したものであるとする。

【0026】第1の視点と第2の視点からの計測結果を※

$$E = E_1 + E_2 \\ = c_1 \xi_1^2 + c_2 \eta_1^2 + 2c_3 \xi_1 \eta_1 + 2c_4 \xi_1 + 2c_5 \eta_1 + c_6 \quad \dots (54)$$

となる。ただし、係数 $c_1 \sim c_6$ は、

【数18】

$$c_1 = \frac{1}{r_{\theta 1}^2} + \frac{\cos^2 \theta}{r_{\theta 2}^2} + \frac{\sin^2 \theta}{r_{\theta 2}^2} \quad \dots (55)$$

$$c_2 = \frac{1}{r_{\theta 1}^2} + \frac{\sin^2 \theta}{r_{\theta 2}^2} + \frac{\cos^2 \theta}{r_{\theta 2}^2} \quad \dots (56)$$

$$c_3 = \left(\frac{1}{r_{\theta 1}^2} - \frac{1}{r_{\theta 2}^2} \right) \cos \theta \sin \theta \quad \dots (57)$$

$$c_4 = -\frac{t_1 \cos \theta}{r_{\theta 1}^2} + \frac{t_2 \sin \theta}{r_{\theta 2}^2} \quad \dots (58)$$

$$c_5 = -\frac{t_1 \sin \theta}{r_{\theta 1}^2} - \frac{t_2 \cos \theta}{r_{\theta 2}^2} \quad \dots (59)$$

$$c_6 = \frac{t_1^2}{r_{\theta 1}^2} + \frac{t_2^2}{r_{\theta 2}^2} \quad \dots (60)$$

である。式(54)は適当な直交変換により標準方程式(61)に変換できる。

$$E = \lambda_1' \xi'^2 + \lambda_2' \eta'^2 + 2c_4' \xi' + 2c_5' \eta' + c_6 \quad \dots (61)$$

ここで、 λ_1' 、 λ_2' は

$$\lambda^2 - (c_1 + c_2) \lambda + (c_1 c_2 - c_3^2) = 0 \quad \dots (62)$$

の2根である。式(62)の根と係数の関係から、2根の積 ★【数19】

$\lambda_1' \lambda_2'$ は、

★

$$\lambda_1' \lambda_2' = c_1 c_2 - c_3^2$$

$$= \frac{1}{r_{\theta 1}^2 r_{\theta 1}^2} + \frac{1}{r_{\theta 2}^2 r_{\theta 2}^2} + \left(\frac{1}{r_{\theta 1}^2 r_{\theta 2}^2} + \frac{1}{r_{\theta 2}^2 r_{\theta 1}^2} \right) \cos^2 \theta \\ + \left(\frac{1}{r_{\theta 1}^2 r_{\theta 2}^2} + \frac{1}{r_{\theta 1}^2 r_{\theta 2}^2} \right) \sin^2 \theta$$

$$> 0 \quad \dots (63)$$

となり、積 $\lambda_1' \lambda_2'$ の符号は常に正である。また2根の和 $\lambda_1' + \lambda_2'$ も、

【数20】

(9)

特開平4-264207

15

16

$$\lambda_1' + \lambda_2' = c_1 + c_2$$

$$= \frac{1}{r_{e1}^2} + \frac{1}{r_{e1}^2} + \frac{1}{r_{e2}^2} + \frac{1}{r_{e2}^2} \quad \dots (64)$$

となり、その符号は正である。2根の積、和の両者とも * 【0027】ところで式(61)は、
正であることから、 $\lambda_1' > 0$ 、 $\lambda_2' > 0$ すなわち2根と 【数21】
も正であることがわかる。 *

$$E = \lambda_1' \left(\xi' + \frac{c_4'}{\lambda_1'} \right)^2 + \lambda_2' \left(\eta' + \frac{c_6'}{\lambda_2'} \right)^2 + c_6 - \frac{c_4'^2}{\lambda_1'} - \frac{c_6'^2}{\lambda_2'} \quad \dots (65)$$

と変形できる。式(65)は $\xi' = -c_4' / \lambda_1'$ 、 $\eta' = -c_6' / \lambda_2'$ で最小値E、
 $E = c_6 - c_4'^2 / \lambda_1' - c_6'^2 / \lambda_2'$... (66)

をとる。この最小値E より例えば1だけ大きい値E ※は
+1をとる点の軌跡を考えると、その軌跡の方程式※ 【数22】

$$\lambda_1' \left(\xi' + \frac{c_4'}{\lambda_1'} \right)^2 + \lambda_2' \left(\eta' + \frac{c_6'}{\lambda_2'} \right)^2 = 1 \quad \dots (67)$$

で表される。 $\lambda_1' > 0$ 、 $\lambda_2' > 0$ であることより式(67) ★ 【0029】計測誤差を誤差楕円の面積で評価する。第
は楕円を表す。以上の結果から、等誤差面の形状が楕円 1、第2の視点における誤差楕円および合成誤差楕円の
である計測結果を合成すると、合成誤差評価関数Eの表 20 面積をそれぞれ A_1 、 A_2 、 A とすると、 A_1 、 A_2 、 A はそ
す等誤差面も楕円となることが明らかになった。 れぞれ

【0028】次に、多視点画像計測の統合の原理による 【数23】
精度の向上の効果について検討する。 ★

$$A_1 = \pi r_{e1} r_{v1} \quad \dots (68)$$

$$A_2 = \pi r_{e2} r_{v2} \quad \dots (69)$$

$$A_c = \pi \left\{ \frac{1}{r_{e1}^2 r_{v1}^2} + \frac{1}{r_{e2}^2 r_{v2}^2} + \left(\frac{1}{r_{e1}^2 r_{v2}^2} + \frac{1}{r_{e2}^2 r_{v1}^2} \right) \cos^2 \theta \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{r_{e1}^2 r_{e2}^2} + \frac{1}{r_{v1}^2 r_{v2}^2} \right) \sin^2 \theta \right\}^{-1/2} \quad \dots (70)$$

与えられる。式(102)~(104)より明らかに

$$A_1 > A, \quad A_2 > A \quad \dots (71)$$

であり、合成誤差楕円の面積は、もとの2つの誤差楕円 ☆何平均に対する合成誤差楕円の面積の縮小効率 η_A を
の面積のいずれよりも小さい。 【数24】

【0030】ここで、もとの2つの誤差楕円の面積の幾 ☆

$$\eta_A = \frac{A_c}{\sqrt{A_1 A_2}} \quad \dots (72)$$

で定義する。式(68)~(70)を式(72)に代入すると、 【数25】

$$\eta_A = \left[\left(\frac{r_{e1}}{r_{e2}} + \frac{r_{v2}}{r_{v1}} \right) \left(\frac{r_{e2}}{r_{e1}} + \frac{r_{v1}}{r_{v2}} \right) + \left(\frac{r_{e1}}{r_{e1}} - \frac{r_{v2}}{r_{v1}} \right) \left(\frac{r_{e2}}{r_{e2}} - \frac{r_{v1}}{r_{v1}} \right) \sin^2 \theta \right]^{-1/2} \quad \dots (73)$$

が得られる。 r_{e1} 、 r_{e2} を短軸、 r_{v1} 、 r_{v2} を長軸と ◆ 【数26】
していることから、 ◆

$$\frac{r_{v1}}{r_{e1}} \leq 1, \quad \frac{r_{v2}}{r_{e2}} \leq 1 \quad \dots (74)$$

であり、この結果

【数27】

$$\left(\frac{r_{v1}}{r_{e1}} - \frac{r_{e1}}{r_{v1}} \right) \left(\frac{r_{v2}}{r_{e2}} - \frac{r_{e2}}{r_{v2}} \right) \geq 0 \quad \dots (75)$$

が導ける。したがって2つの誤差楕円の長径、短径の大 第1、第2の誤差楕円の長軸が直交する場合に、合成誤
小とは無関係に、 $\theta = \pi/2$ 、 $3\pi/2$ のときすなわち 50 差楕円の縮小効果が最大すなわち誤差分布が最小となる

17

ことがわかる。

【0031】次に、誤差の異方性すなわち誤差楕円の径の大きさの違い、および第1と第2の誤差楕円の長径のなす角度 θ の違いが合成誤差楕円に与える影響について調べる。第1、第2の誤差楕円の長径および短径はそれぞれ等しく $r_{11}=r_{12}$ 、 $r_{21}=r_{22}$ であるとし、長径と短径の比を $k(=r_{11}/r_{12}=r_{21}/r_{22})$ であるとする。 k をそれぞれ1, 2, 4, 8, 16とし、 θ をそれぞれ $0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8, \pi/2$ としたときの合成誤差楕円の形状を求めた結果を図9に示す。さらに上記各 k の値に対し、 $0 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲で θ を連続的に変化させたときに式(73)より算出される η_1 の値の変化の様子を図10に示す。図9、図10より、誤差の異方性が大きければ大きいほど、第1と第2の誤差楕円の長軸のなす角度 θ が0より少し大きいだけでも、合成誤差楕円の縮小効果が著しくなることがわかる。また、前述したように第1、第2の誤差楕円の長軸が直交する場合に縮小効果が最大となることから、異なる2視点から物体を計測する場合、その物体上において視線が直交するように前記2つの視点の位置関係を選べば、より精度よく計測が行なえることがわかる。

【0032】

【実施例】次に、本発明の多視点ステレオ画像計測方法の実施例について図面を参照して説明する。図1は本発明の一実施例の多視点ステレオ画像計測方法における視点と計測対象の物体の配置を説明する説明図、図2は図1を計測対象の物体付近で拡大した説明図である。なお、図2において、 x_1 軸と y_1 軸の交点の座標は(-1, 35)である。

【0033】計測は第1の工程から第3の工程までの3工程からなっている。図1に示すように、視点の数は2つであり、カメラ間隔(2a)を1mとし、各カメラには焦点距離すなわち投影中心と画像面との距離が16.1mmのレンズを装着して計測を行なった。以下、特に断らない限り、座標値はmm単位で記述されているものとする。図1において○で示すように第1の視点と第2の視点を設定し、●で表される計測対象の物体の座標を計測した。第2の視点座標系 O_2 の原点を第1の基準座標系で記述すると(28.03, 36.23)となり、第1の視点座標系から第2の視点座標系への回転角度は 87.4° である。回転角度を 90° に近くしたのは、上述したように、2つの誤差楕円の長軸が直交するときに精度の向上が最大になるためである。また、計測対象の物体の真の座標 P^0 は既知であって、第1の視点座標系によりその値を表すと(-2.30, 36.76)である。

【0034】まず第1の工程として、第1の視点において計測対象の物体をカメラで撮影し、撮影されたステレオ画像を演算処理し、第1の視点座標系により表された計測対象の座標

【外13】

18

特開平4-264207

$$\tilde{P}_1$$

を求めた。その結果、(-2.49, 36.02)が得られた。この第1の視点からの計測結果の座標を図1、図2において+で表す。

【0035】次に第2の工程として、第2の視点において計測対象の物体をカメラ撮影し、撮影されたステレオ画像を演算処理し、第2の視点座標系により表された計測対象の座標

【外14】

$$\tilde{P}_2$$

を求めた。その結果、(-0.87, 29.67)が得られた。この第2の視点座標系で表された座標値を第1の視点座標系における値

【外15】

$$\tilde{P}_2$$

に変換すると、(-1.65, 36.69)となる。第2の視点からの計測結果を図1、図2において□で表す。

【0036】次に第3の工程として、計測対象の最尤推定位置を求めた。上述した手順に従い、第1、第2の各視点からの計測結果を上記式(33)~(38)、(48)、(49)に代入した。その結果、第1の視点座標系で表した最尤推定座標

【外16】

$$\hat{P}_1$$

は(-2.56, 36.71)となり、真の位置からのずれは0.26mであった。この最尤推定座標を図2において△で表す。一方、従来の重み付き平均法で得られる推定座標は(-1.99, 36.42)であり、その真の位置からのずれは0.45mである。この従来法による推定座標を図2において×で表す。以上の結果から、本実施例の測定結果は従来例に比べ約2倍の精度を有し、本発明の多視点ステレオ画像計測方法によって高精度の計測が行なえることがわかった。

【0037】

【発明の効果】以上説明したように本発明は、複数の視点間の相対位置関係に基づいて、複数の視点からの計測の誤差の確率密度関数を求め、確率密度関数を合成して最尤推定位置を求めることにより、誤差の異方性が結果に反映され、従来の方法に比べ、(1)計測精度を向上でき、(2)計測精度をよくするための視点の位置を決定することができる、という効果を有する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施例の多視点ステレオ画像計測方法における視点と計測対象の物体の配置を説明する説明図である。

【図2】図1の計測対象の物体付近を拡大した説

19

明図である。

【図3】ステレオ画像計測の原理を説明する図である。

【図4】ステレオ画像計測に用いられる装置の構成を示すブロック図である。

【図5】視点座標系間の関係を示す説明図である。

【図6】従来の多視点ステレオ画像計測方法の測定原理を説明する図である。

【図7】誤差楕円間の位置関係を説明する図である。

【図8】各視点座標系間の関係を示す説明図である。

【図9】誤差の異方性と合成誤差楕円の形状との関係を示す図である。

【図10】誤差楕円の長軸間の角度と誤差楕円の縮小効

(11)

20

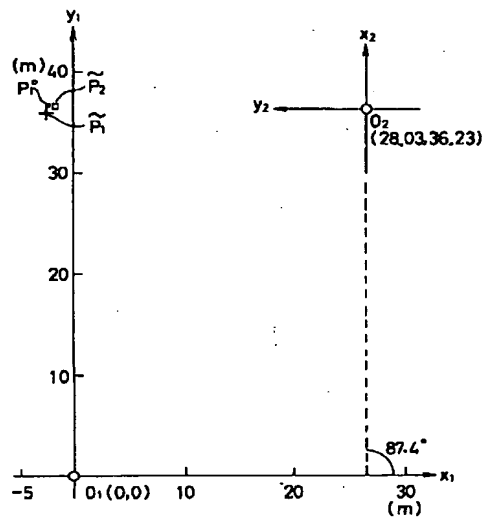
特開平4-264207

率との関係を示した特性図である。

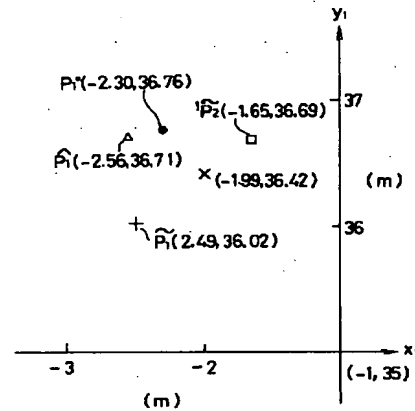
【符号の説明】

- 1 光軸
- 2 左カメラの画像面
- 3 右カメラの画像面
- 4 テレビカメラ
- 5 デジタイザ
- 6 画像メモリ
- 7 計算機
- 10 楕円
- 11 第1の誤差楕円
- 12 第2の誤差楕円

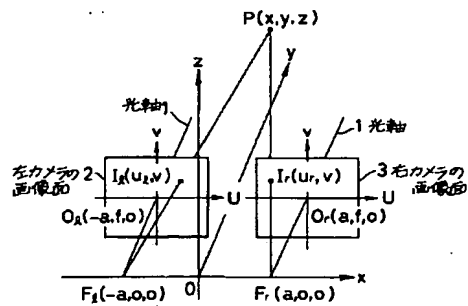
【図1】



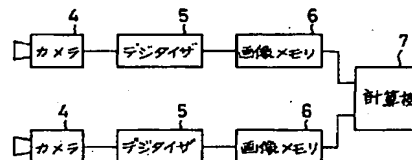
【図2】



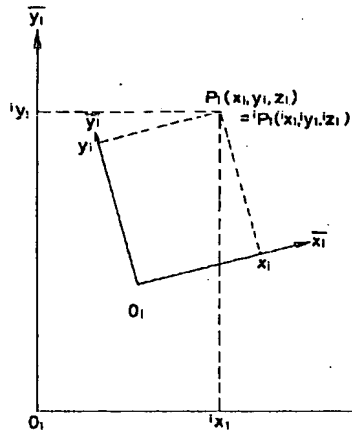
【図3】



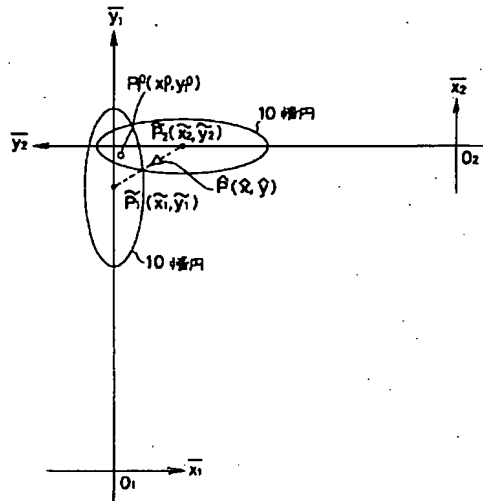
【図4】



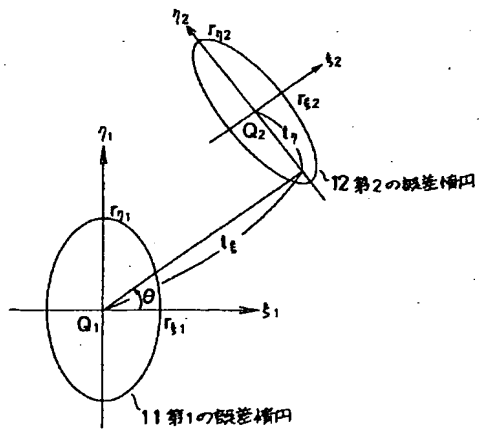
【図5】



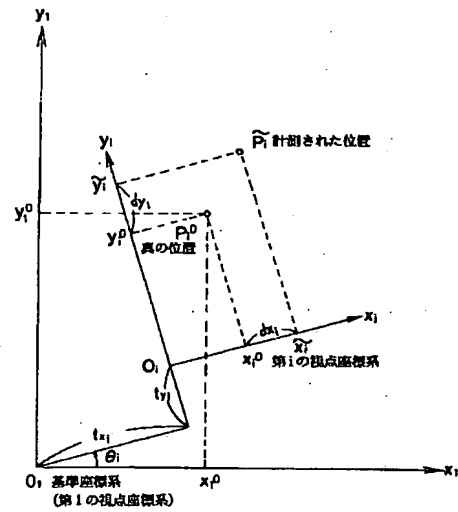
【図6】



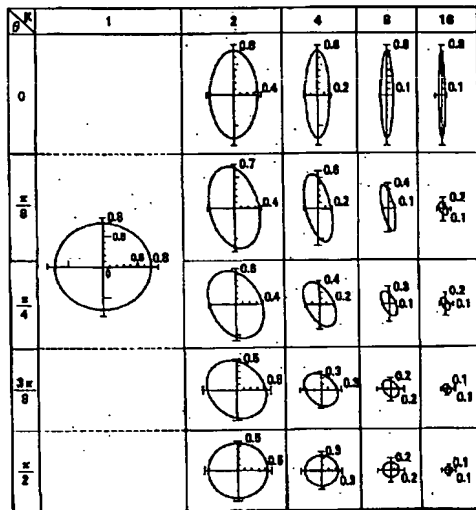
【図7】



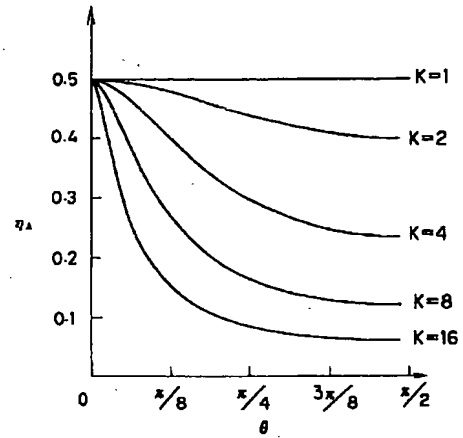
【図8】



【図9】



【図10】



フロントページの続き

(72)発明者 井手 敦志
 東京都千代田区内幸町一丁目1番6号 日
 本電信電話株式会社内